

Aapo Räsänen

ALKALIKIVIAINESREAKTIO

Hallinta uudisrakentamisessa

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Syyskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Aapo Räsänen : Alkalikiviainesreaktio
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2019

Alkalikiviainesreaktion aiheuttamasta betonin rapautumisesta on tullut ongelma myös Suomen betonirakenteissa. Reaktion aiheuttamien ongelmien vuoksi täytyy uusien betonirakenteiden suunnittelussa ottaa huomioon myös kyseisen reaktion aiheuttama vaikutus käyttöikänsä. Työn tavoitteena oli selvittää yleisimmät alkalikiviainesreaktioon vaikuttavat tekijät sekä mahdollisuudet vaikuttaa sen laajuuteen uudisrakentamisessa. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Työn alussa selvitettiin reaktioon vaikuttavia tekijöitä sekä niiden vaikutuksia sen laajuuteen. Tutkimuksessa vaikuttavien tekijöiden selvittämisen jälkeen esitettiin betonin materiaalien valintaan liittyviä suosituksia kiviaineksen, sementin sekä olosuhteiden osalta. Reaktion hallintaan liittyen esiteltiin suunniteltavan rakenteen arviointiin liittyvä ohje, jonka avulla voidaan rakenteelle suunnitella tarvittavat toimenpiteet reaktion hallintaan.

Tutkimuksen perusteella reaktion hallitsemiseen vaaditaan tarkempia tutkimuksia erityisesti vaativien kohteiden osalta. Vaativiin kohteisiin voidaan sisällyttää rakenteen, joihin reaktion aiheuttamia heikentäviä vaikutuksia rakenteen toimintaan ei sallita.

Avainsanat: Alkalikiviainesreaktio, alkalipiidioksidireaktio, APR, ASR

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ALKALIPIIDIOKSIDIREAKTIO	2
3. ESIINTYMINEN JA SEURAUKSET	4
4. MATERIAALIVALINTA	6
4.1 Kiviaines	6
4.2 Sementti	9
4.3 Olosuhteet	13
4.4 Rakenteen arviointi	13
5. YHTEENVETO	16
LÄHTEET	17

1. JOHDANTO

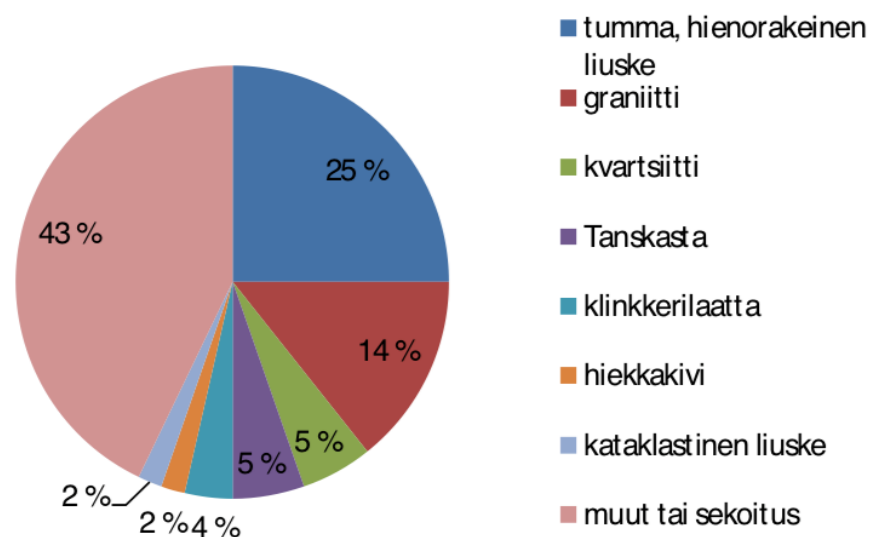
Alkalikiviainesreaktio on yksi betonin rapautumiseen johtava tekijä, jonka olemassaoloa on Suomessa epäilty ennen kyseiseen reaktioon liittyvien tapausten yleistymistä. Reaktio tunnetaan Suomessa myös englanninkieliseltä nimeltään alkali-aggregate reaction (AAR). Kyseessä on hitaasti etenevä reaktio eikä Suomessa tapauksia ole esiintynyt aikaisemmin merkittävästi, joten tapausten ilmenemisen johdosta asia on herättänyt keskustelua ja mielenkiintoa niin alan asiantuntijoissa kuin sivusta seuraajissa. Yksi tutkimuksen pääaiheen valintaan vaikuttanut tekijä on perehtyä asiaan syvällisemmin mahdollisten tapausten yleistymisen vuoksi. Suurin huolenaihe johtuu reaktion aiheuttamien halkeilujen synnystä ja näkyvyydestä herättäen kysymyksiä rakenteen kantavuutta koskien. Syntyvä halkeilu aiheuttaa ulkonäköpaineita myös rakennuksen omistajille.

Reaktiosta tunnetaan kolme erilaista muotoa, joista yleisin ilmiön aiheuttaja on alkalipiidioksidireaktio (ASR) (englanniksi alkali-silica reaction). Alkalipiidioksidireaktiossa on kyse kemiallisesta reaktiosta kiviaineksen sisältämien piidioksidien, sementtikiven huokosvedessä olevien alkalien sekä sementin ja veden reagoimisessa, eli hydratoitumisessa muodostuvien hydroksyyli-ionien kesken. Alkalipiidioksidireaktiosta kerrotaan tarkemmin omassa luvussaan. Toinen tunnettu alkalikiviainesreaktio (englanniksi alkali-silicate reaction) on nimeltään alkalisilikaattireaktio, minkä tunnetaan olevan erittäin samankaltainen reaktio kuin alkalipiidioksidireaktio. Ero näiden kahden reaktion välillä on, että alkalisilikaattireaktiossa kiviaineksen reaktiivinen aines on kivessä olevan piidioksidin sekä silikaattimineraalien sekoitus. Viimeinen tunnettu reaktio kyseisestä aiheesta on alkalikarbonaattireaktio (englanniksi alkali-carbonate reaction) ja siinä on kyse savi-pitoisissa dolomiittikivissä tapahtuvasta reaktiosta alkali-ionien sekä hydroksyylien välillä. Reaktiossa jännityksiä aiheuttava paisuminen johtuu savesta eikä geelistä, kuten aikaisemmin mainituissa reaktiossa. (Silva 2005, Pyy et al. 2012)

Työssä on tarkoitus esitellä lyhyesti alkalikiviainesreaktion mekanismi ja käsitellä sen hallitsemista uudisrakentamisessa. Koska alkalipiidioksidireaktio on yleisin ilmiön aiheuttaja erityisesti Suomessa, keskitytään työssä sen hallintaan. Työn luettua lukijalla on käsitys alkalipiidioksidireaktioon vaikuttavista tekijöistä ja mahdollisuuksista vaikuttaa sen hallintaan.

2. ALKALIPIIDIOKSIDIREAKTIO

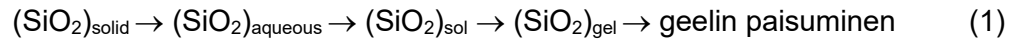
Alkaliipiidioksidireaktiossa on kyse siinä muodostuvan alkaliippiyhdistegeelin, ASR-geelin, paisumisesta aiheuttaen mahdollisia vaurioita rakenteeseen. Geelin muodostumiseksi vaaditaan reaktiivisia piidioksidimineraaleja, kuten vulkaanista lasia, opaalia, kalsedonia ja tiettyjä sertin tai limsiön muotoja sisältäviä kiviaineksia. Kiviaineksia pohdittaessa pitää kuitenkin muistaa, että kaikki piidioksidimineraaleja sisältävät kiviainekset voivat olla reaktiivisia riippuen reaktiivisen mineraalin suuresta ominaispinta-alasta, heikosta kiteytymisestä tai mikäli mineraalissa on lasittumia, hilavirheitä, amorfisia kohtia tai mikrohuokosia. (Pyy et al. 2012, s. 6) Reaktiivisia kivilajeja eri mantereilta on esitelty RILEM:n (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) suosituksessa (Fernandes et al. 2016). Suomessa alkalikiviainesreaktiossa havaittuja reaktiivisia kivilajeja on esitelty kuvassa 1.



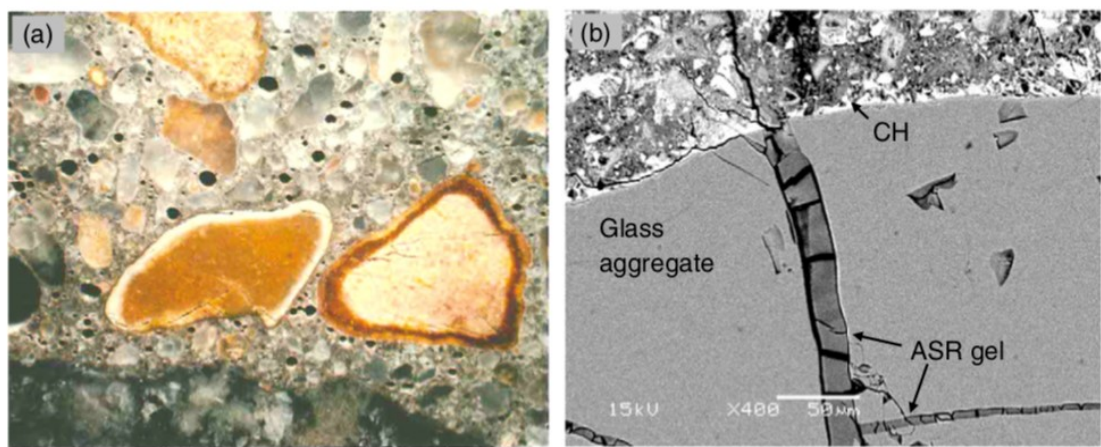
Kuva 1. VTT:n kyselyn tuloksia Suomessa esiintyneistä reaktiivisista kivilajeista (Pyy et al. 2012, s.16).

Geeli muodostuu betonissa alkalihydroksidien, kuten natriumhydroksidien (NaOH) sekä kaliumhydroksidien (KOH), reaktiosta kiviaineksen sisältämien piidioksidien kanssa. Alkalisuus on yleisesti peräisin betonissa käytetystä sementistä. Alkaliipiidioksidireaktiota ei ole kuitenkaan mahdollista määritellä pelkästään alkalipitoisuuden perusteella, sillä alkalien reaktio piidioksidien kanssa riippuu kiviaineksen reaktiivisista ominaisuuksista. Geelin syntyyn vaikuttaa suuresti myös sementtipastan läpäisevyys, joka vaikuttaa alkalisen huokosveden kulkeutumiseen. Huokosveden hidas kulkeutuminen voi olla yksi tekijä reaktion alun pitkäkestoisuuteen. (Rajabipour et al. 2015)

Reaktiomekanismi koostuu neljästä eri vaiheesta (kaava 1). Ensimmäinen vaihe tässä mekanismissa on piidioksidin liukeneminen. Toisena vaiheena tulee hyytelömäisen pii-liuoksen syntyminen, joka geeliiytyy aikaisemminkin mainituksi ASR-geeliksi. Viimeinen mekanismin vaihe on geelin paisuminen.



ASR-geelin ominaisuuksiin kuuluu voimakas veden imeytyminen eli hygroskooppisuus, mikä aiheuttaa geelin voimakkaan paisumisen ja rapauttaa betonirakennetta. Geelin paisuminen voi tapahtua kiviaineksen pinnalla, tai sen sisäisissä mikrohalkeamissa riippuen reaktiivisen piidioksidin sijainnista (kuva 2).



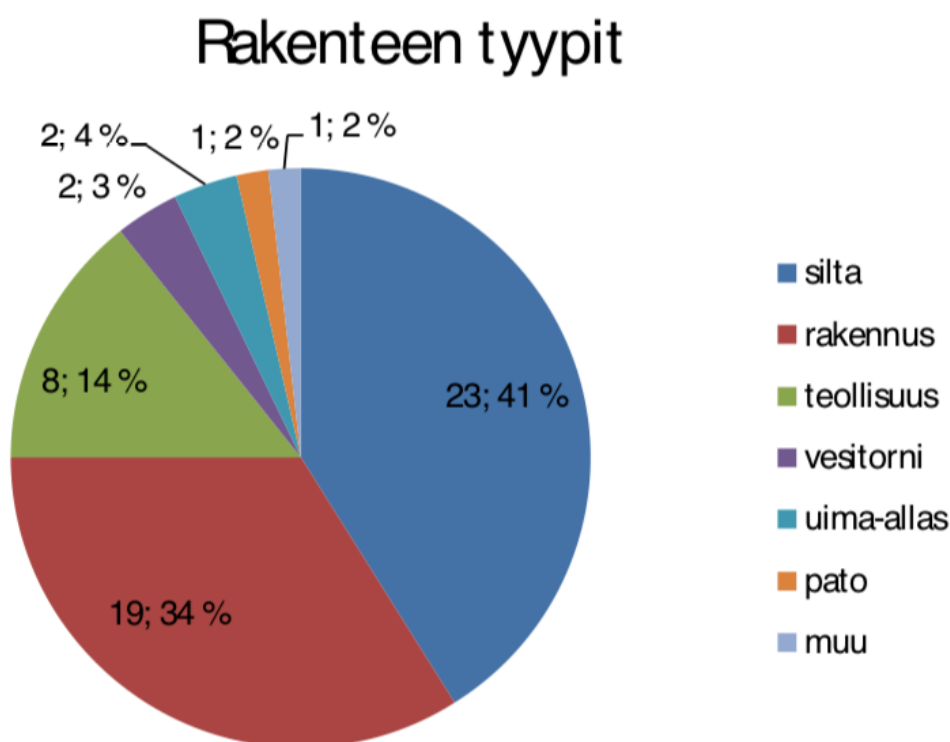
Kuva 2. ASR-geelin muodostuminen kiviaineksen a) pinnalla (Lane 1994, s.16) ja b) sisällä (Rajabipour et al. 2012, Rajabipour et al. 2015, s.134 mukaan).

Kun reaktiiviset piyhdisteet ovat tasaisesti kiviaineksessa, muodostuu geeli kiviaineksen pintaan irrottaen sementtikiven ja kiviaineksen tartuntaa toisistaan. Geelin muodostuessa kiviaineksen mikrohalkeamiin aiheuttaa se kiviaineksen halkeilua. (Rajabipour et al. 2015)

Alkali-piidioksidireaktion kehittymiselle on edellytyksenä alkalien ja piidioksidin lisäksi betonin 80 %:n suhteellinen kosteuspitoisuus 21 °C lämpötilassa. Geeli alkaa paisumaan jo 50 %:n suhteellisessa kosteuspitoisuudessa, vaikkakin merkittävä paisuminen alkaa vasta 80 %:n kohdalla. (Poole 1991, Lahdensivu et al. 2018 mukaan) Reaktiosta voi kuitenkin tulla merkittävää alhaisellakin kosteuspitoisuudella lämpötilan noustessa. Lämpötilan nousu kiihdyttää reaktiota ja nopeuttaa täten sen vaikutuksia rakenteessa. Reaktion suuruus lämmön noustessa riippuu kuitenkin käytetyn kiviaineksen ominaisuuksista. (Wigum et al. 2006, Holt & Ferreira 2013 mukaan)

3. ESIINTYMINEN JA SEURAUKSET

Riittävän suhteellisen kosteuspitoisuuden ja korkean lämpötilan kiihdyttävän vaikutuksen seurauksena rajautuvat rakenteet, joissa alkalipiidioksidireaktiota voi esiintyä. Reaktio on täten merkittävää riittävän kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa, kuten silloissa. Suomessa esiintyneitä reaktioita on todettu eniten silloissa (kuva 3), jonka jälkeen tulevat rakennukset. Tämä perustuu kuntotutkimuksista löydettyihin tuloksiin, joten sen tulokset eivät kerro tarkkaa määrää reaktiolle altistuneista rakenteista. Kosteuspitoisuutta sekä lämpötilaa pohdittaessa tulee kuitenkin muistaa, että reaktion olennainen osa on alkalit ja kiviaines, jotka vaikuttavat reaktion laajuuteen.



Kuva 3. Tutkimuksessa esiintyvät rakennetyypit (Pyy et al. 2012, s. 15)

Silloille tyypillinen korkea kosteuspitoisuus sekä korkea lämpötila johtavat reaktion nopeuteen, ja se huomataan tutkimuksen tuloksista (Pyy et al. 2012). Sijainnista riippuen myös rakennuksille sekä teollisuudelle on ominaista samat olosuhteet kuin silloille. Uima-altaille tyypillinen korkea lämpötila sekä kosteus aiheuttavat suuren riskin reaktiolle.

Muulla maailmalla reaktio on saanut näkyvyyttä useiden esiintymisten johdosta. Alkali-kiviainesreaktiota on tunnistettu yli 50 maassa kuten Kanadassa, missä reaktio tyypillisesti esiintyy 5 - 10 vuoden jälkeen (Bragg 2000). Suomen rakenteissa reaktio ilmenee

vasta noin 40 vuoden ikäisenä (Lahdensivu et al. 2018). Reaktiota esiintyy erilaisissa rakenteissa, joissa vaatimukset täyttyvät olosuhteiden ja käytettyjen materiaalien osalta, eikä näin ole yhtä tiettyä rakennetyyppiä, jossa sitä ainoastaan esiintyisi. Myös Suomen naapurimaissakin on tunnistettu tapauksia jopa 1900-luvun puolivälissä, mikä ihmetyttääkin Suomen vähäisten tapausten tilannetta.

Reaktion seurauksena muodostunut geeli paisuu veden imeytymisestä, mistä seuraa vetojännityksiä betoniin. Jännitysten ylittyminen aiheuttaa tiheää verkkomaista halkeilua rakenteeseen (kuva 4), mikä on tyypillinen merkki alkalipiidioksidireaktion tunnistamiseen. Geelin paisuminen voi johtaa jopa 10 MPa:n tasaiseen paineeseen ympärilleen (Kawamura & Iwahori 2004, Owsiak et al. 2015 mukaan).



Kuva 4. Alkalipiidioksidireaktion esiintyminen sillan kansilaatassa Paltaanmäellä (Holt & Ferreira 2013, s. 11).

Kuvasta 4 nähdään vaaleaa geelin valumista betonin pintaan, mikä on myös tyypillinen merkki reaktion tunnistamiseen. Reaktio voidaan sekoittaa yleiseen pakkasrapautumiseen, jossa syntyvä halkeilu voi olla samankaltaista kuin alkalipiidioksidireaktiossa. Erona näiden kahden välillä on halkeilun sijainti. Alkalipiidioksidireaktion seurauksena syntyvä halkeilu esiintyy laajalti koko betonissa, kun pakkasrapautumisen aiheuttama halkeilu alkaa pinnan lähettäviltä. (Holt & Ferreira 2013) Alkalipiidioksidireaktion aiheuttama pieni halkeilu voi myös altistaa rakenteen pakkasrapautumiselle tai muille eri rapautumisilmiöille.

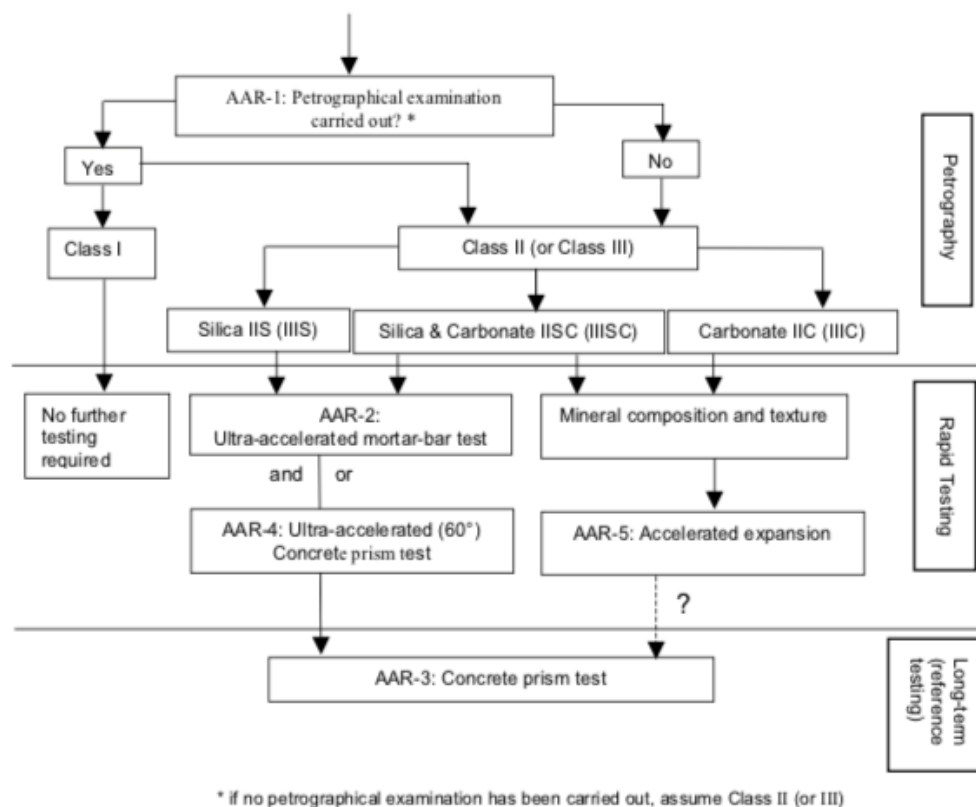
Reaktion aiheuttamasta halkeilusta seuraa myös kestävyys heikkenemistä. Heikkeneminen tarkoittaa enemmän vetokestävyys kuin puristuskestävyyden pienenemistä, koska reaktiossa muodostunut geeli irrottaa kiviainesta sementtikivistä vaikuttaen enemmän vetokestävyyteen. (Lahdensivu et al. 2018)

4. MATERIAALIVALINTA

Alkaliipidioksidireaktioon vaikuttaa merkittävimmin betonin kiviaines, alkalipitoisuus sekä suhteellinen kosteuspitoisuus. Yhdenkin edellä mainitun tekijän puuttuminen keskeyttää reaktion etenemisen. Lämpötilan vaikutus on reaktiota kiihdyttävä ja siksi se on myös yksi merkittävimmistä tekijöistä. Uusia rakenteita suunniteltaessa täytyy pystyä hallitsemaan nämä merkittävimmät tekijät, jotta rakenteiden elinkaari saadaan suunnitellun pituiseksi. Kosteudenhallinnan lisäksi alkaliipidioksidireaktion laajuuteen voidaan vaikuttaa kiviaineksen valinnalla sekä rajoitetulla alkalipitoisuudella.

4.1 Kiviaines

Reaktiivisten kiviainesten tutkintaan on julkaistu suositus RILEM:n toimesta, missä esitellään tutkimusmenetelmiä kiviaineksen reaktiivisuuden määrittämiseksi. Kiviaineksen tutkintaan on neljä eri tutkimusmenetelmää petrograafinen menetelmä, kiihdytetty laastiprismamenetelmä, nopeutettu betoniprismatesti sekä ei-nopeutettu betoniprismatesti. Näiden menetelmien avulla RILEM on tehnyt kaavion tutkimuksen etenemisestä kuvassa 5. (Sims & Nixon 2003)



Kuva 5. Reaktiivisen kiviaineksen tutkimisen kaava (Sims & Nixon 2003, s. 473).

Petrograafinen tutkimusmenetelmä jaetaan kahteen eri tekniikkaan partikkelin tunnistettavuuden mukaan, makroskooppiseen ja ohuthiemenetelmään. Makroskooppista tutkimusta käytetään näytteisiin, joissa laadun erottelu sekä koostumuksen määrittäminen on helpompaa (> 4mm raekoko). Ohuthiemenetelmä toimii näytteille, joissa koostumuksen tunnistaminen on haastavaa makroskooppisessa tutkimuksessa (< 4mm raekoko). Kokonaisuudessaan tutkimuksesta saadaan hyvin selville kiviainestyyppi sekä näytteen mineraalikoostumus. Sen avulla voidaan määrittää kiviaines joko luokkaan yksi, erittäin todennäköisesti ei-reaktiivinen, tai luokkaan kaksi ja kolme, joista seuraa jatko-tutkimukset. Luokka kaksi tarkoittaa epävarmaa ja luokka kolme hyvin todennäköistä reaktiivisuutta. Tuloksen mukaan voidaan kiviaines määrittää tarkemmin sen mineraalikoostumuksen perusteella luokkiin II-S, III-S, II-SC, III-SC, II-C tai III-C piidioksidi- ja karbonaattipitoisuuksien perusteella. Luokat II-S ja III-S määräytyvät kokemukseen perustuen reaktiivisen piidioksidipitoisuuden mukaan. Luokkaan III-S kuuluu kiviainekset, joissa piidioksidipitoisuuden tiedetään olevan reaktiivinen. Luokkaa II-S käytetään, kun ei olla varmoja kiviaineksen sisältämän piidioksidin reaktiivisuudesta. (Nixon & Sims 2016, s. 35–60)

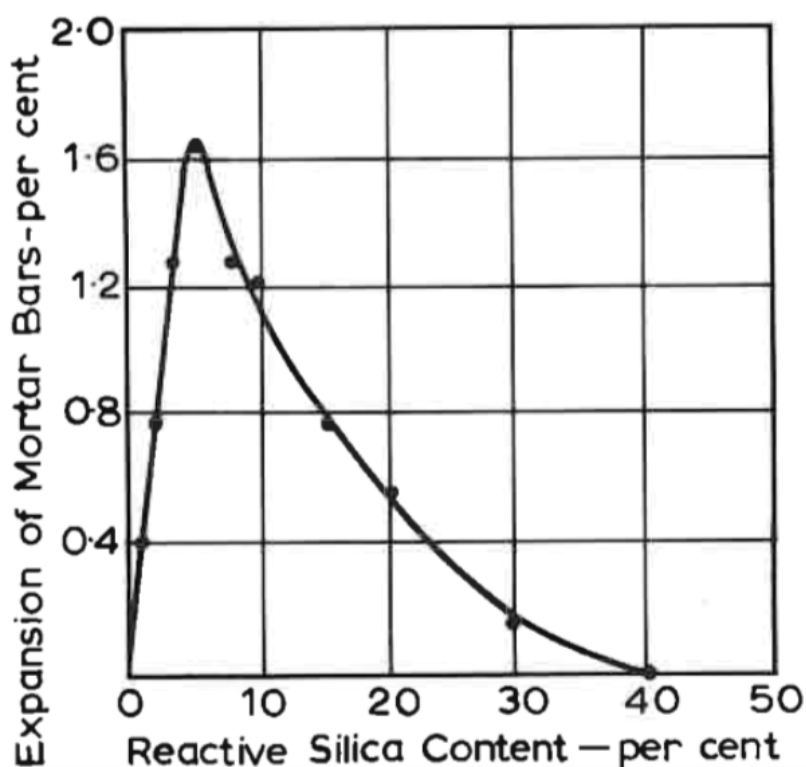
Jatkotutkimukset määräytyvät koostumusluokkien perusteella ja molemmat piidioksidi-luokat, II-S ja III-S, jatkuvat kiihdytetyllä laastiprismatutkimuksella. Laastiprismatutkimus osoittaa potentiaalisen reaktiivisuuden alkaleille seuraten reaktiosta johtuvaa laajenemista kiihdytetyssä koeympäristössä ohjeistuksen mukaisesti. Kiihdytetty koeympäristö tarkoittaa näytteen tutkimista korkeassa alkalipitoisuudessa kostealle näytteelle. Tutkimus kestää 14 päivää, jonka jälkeen tulokset voidaan kerätä. Tutkimusmenetelmä toimii erityisen hyvin hitaasti reagoivien kiviainesten tutkimiseen. Menetelmän käyttöön on suosituksena, että näyte sisältää vähemmän kuin kaksi massaprosenttia huokoista piikiveä. (Nixon & Sims 2016, s. 61–77)

Kiihdytetystä laastiprismamenetelmästä voidaan siirtyä nopeatettuun betoniprismamenetelmään, missä tuloksena saadaan laastiprismamenetelmän kaltaisesti mitattua näytteen paisumista. Betoniprismamenetelmää voidaan käyttää kiviainesyhdistelmille tunnistamaan betonin reaktiivisuus. Menetelmä toteutetaan ohjeistusten mukaiselle betoni-näytteelle käyttäen korkea-alkalista sementtiä, korkeaa lämpötilaa (60 °C) sekä korkeaa kosteuspitoisuutta. (Nixon & Sims 2016, s. 99–116)

Nopeatettujen testien jälkeen on vaihtoehtona siirtyä betoniprismamenetelmään, jossa olosuhteet nopeatettuun versioon poikkeavat erityisesti ajallisesti. Tässä menetelmässä näyte asetetaan 38 °C lämpötilaan 12 kuukaudeksi käyttäen korkea-alkalista sementtiä. Tuloksista voidaan tulkita laajenemisesta johtuvia vaurioita realistisemmissa olosuh-

teissa kuin nopeutetuissa menetelmissä. Tutkimus voidaan tehdä myös alkalipitoisuuksien kynnysarvojen määrittämiseksi. Kynnysarvojen määrittäminen vaikuttaa sementin valintaan ja edesauttaa reaktion ehkäisemistä. (Nixon & Sims 2016, s. 79–98)

Kiviaineksen sisältämän piidioksidin on huomattu vaikuttavan sen reaktiivisuuden sekä määrän osalta. Pienempi määrä reaktiivista piidioksidia rakenteessa aiheuttaa laajemman reaktion kuin suurempi määrä ei niin reaktiivista. On olemassa niin kutsuttu ”pessimum” käyttäytyminen, joka tarkoittaa, että sekoitus reaktiivisista sekä ei-reaktiivisista piidioksidoista käyttäytyy vaihtelevasti riippumatta sekoituksen kokonaismäärästä. (Nixon & Sims 2016, s. 143) Piidioksidin määrän vaikutuksesta näytteen laajenemiseen on merkitty kuvaan 6, josta nähdään suuremman määrän vähentävän reaktiota näytteessä. Reaktiivinen piidioksidi aiheuttaa suuren reaktion pienilläkin pitoisuuksilla, mutta hienon reaktiivisen piidioksidin lisääminen vähentää reaktiota tietyn pitoisuuden jälkeen (Neville 1995, Lahdensivu et al. 2018 mukaan).



Kuva 6. Reaktiivisen piidioksidin määrän vaikutus näytteiden paisumiseen (Neville 1995, Lahdensivu et al. 2018, s. 35 mukaan).

Piidioksidipitoisuuden muuttaminen vaatii tarkkoja tutkimuksia kiviaineksen reaktiivisuudesta, eikä tarkkoja määritelmiä tietyille määrille ole eri piidioksidien eroavaisuuksien vuoksi. Erilaisten piidioksidien perusteella on tärkeää tehdä tutkimukset kiviainekselle ja selvittää sen reaktiivisuus ennen käyttöönottoa.

Petrograafisen menetelmän avulla saatuja reaktiivisia kivilajeja on esitelty RILEM:n ohjeistuksessa (Nixon & Sims 2016). Ohjeistuksen reaktiivisiin kivilajeihin kuuluu myös Suomessakin käytettyjä kivilajeja, kuten piikivi, dolomiitti, gneissi, graniitti ja kvartsi. Monia muitakin kivilajeja on luokiteltu reaktiiviseksi. (Nixon & Sims 2016)

4.2 Sementti

Reaktioon tarvittavat alkalit johtuvat pääasiassa betonin sisältämästä sementistä. Yleisin Suomessa käytetty sementtityyppi on portlandsementti, jossa alkalisuus on tyypillisesti peräisin natriumista ja kaliumista. Sementin alkalipitoisuus ilmoitetaan tyypillisesti Na_2O -ekvivalenttina [%] (kaava 2).

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{EQ}} = \text{Na}_2\text{O} \% + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \% \quad (2)$$

Alkalisuuden rajoittaminen rakenteessa on yksi keino ehkäistä alkalikiviainesreaktion etenemistä. Yleisesti käytetään portlandsementille alhaisalkalisuusrajaksi 0,6 % $\text{Na}_2\text{O}_{\text{EQ}}$. Kiviaineksen reaktiivisuuden mukaan on julkaistu taulukko (taulukko 1) alkalirajapitoisuudelle RILEM:n suosituksissa alkalikiviainesreaktiota vastaan (Nixon & Sims 2016).

Taulukko 1. Alkali-*rajapitoisuudet kiviaineksen reaktiivisuuden mukaan (Nixon & Sims 2016, s. 141).*

Aggregate reactivity	Alkali limit ($\text{kg/m}^3 \text{ Na}_2\text{O eq.}$)
Low	None required
Medium	Typically 3.0–3.5 kg/m^3
High	Typically 2.5–3.0 kg/m^3

Taulukon mukaan ei-reaktiivisen kiviaineksen kanssa ei alkalipitoisuutta tarvitse rajoittaa. Vähän reagoivan tai korkeasti reagoivan kiviaineksen kanssa alkalisuus rajoittuu 3.0-3.5 kg/m^3 . Taulukon alin luokka tarkoittaa kiviainesta, jonka on tutkittu omaavan alhaisen kynnysarvon alkalisuudelle. Tämän alimman luokan alkalirajoitus 2.5-3.0 kg/m^3 on siksi alhaisempi kuin edellisellä luokalla. (Nixon & Sims 2016, s. 141)

Alkali-*piidioksidireaktion ominaisuuksiin vaikuttaa betonin kalsiumpitoisuus, joka vaikuttaa reaktion ominaisuuksiin. Betonin kalsiumpitoisuus on peräisin sementin hydratoitumisessa muodostuvasta kalsiumhydroksidista (CaOH_2). Korkea kalsiumpitoisuus estää piidioksidin liukenemisen kiviaineksesta, kun taas kalsiumin vähäisyys päästää piidioksidin liukenemaan alkalihydroksidiliuokseen aiheuttamatta reaktion vahinkoja. (Chatterji, Clausson-Kass 1984; Thomas 1998, Rajabipour et al. 2015 mukaan) Kalsium voi myös*

korvata alkaleita ja muodostaa reaktiivista kalsiumsilikaattigeeliä (Rajabipour et al. 2015).

Valmiin sementin ominaisuuksiin vaikutetaan eri seosaineilla, joita tyypillisesti ovat lentotuhka, masuunikuona ja silika. Näiden seosaineiden lisäämisellä voidaan vaikuttaa reaktioon vähentävästi. Lentotuhkan lisääminen vähentää huokosveden alkalisuutta sekä kasvattaa betonin vetolujuutta, mikä vähentää halkeamien syntymistä (Shafaatian et al. 2013). Masuunikuonan lisääminen vähentää lentotuhkan tavoin alkalisuutta sekä lisäksi portlandiittien määrää. Reaktioon vaikuttavien kalsiumhydroksidien määrää vähenee portlandiittien vähenemisen myötä. (Fernández-Jiménez & Puertas 2002) Silikan lisääminen muodostaa läpäisemättömän kennoston, jolloin veden ja alkalien kulkeutuminen estyy (Kropp 1995, Bobby et al. 2000 mukaan). Tämä vähentää reaktioon tarvittavien alkalien määrää sekä syntyneen ASR-geelin kulkeutumista.

Seosaineiden vaikutuksista alkalipiidioksidireaktioon on tutkittu RILEM:n ohjeistuksen mukaisesti käyttäen nopeutettua betoniprismamenetelmää (Yazıcı et al. 2019). Tutkimuksen tuloksista (taulukko 2) nähdään, että kaikkien edellä mainittujen seosaineiden lisäämisellä on vähentävää vaikutusta reaktioon.

Taulukko 2. Lentotuhkan (FA), masuunikuonan (GGBFS) ja silikan (SF) vaikutukset koekappaleen laajenemiseen (Yazıcı et al. 2019, s. 612).

		AMBT 14-Day		AAR-4 20-Week		AMBT 14-Day		AAR-4 20-Week	
Moist-Cured Specimens	(A) Aggregate	Percent (%)		LN0.25		72	122		
		FA10	40	17	LN0.50	75	66		
		FA20	12	7	LN1.0	61	10		
		FA30	10	7	LH0.25	46	30		
		FA40	8	10	LH0.50	42	7		
		GGBFS10	39	17	LH1.0	32	6		
		GGBFS20	25	11	LN0.50+FA10	36	12		
		GGBFS30	15	12	LN0.50+FA20	13	8		
		GGBFS40	8	8	LN0.50+GGBFS10	39	43		
		SF5	55	15	LN0.50+GGBFS20	29	13		
		SF7.5	39	13	LN0.50+SF5	57	16		
		SF10	34	11	LN0.50+SF7.5	56	12		
	(B) Aggregate	Percent (%)		LN0.25		96	140		
		FA10	47	57	LN0.50	88	149		
		FA20	14	7	LN1.0	80	155		
		FA30	7	2	LH0.25	58	147		
		FA40	4	2	LH0.50	25	142		
		GGBFS10	106	67	LH1.0	15	3		
		GGBFS20	62	67	LN0.50+FA10	25	52		
		GGBFS30	41	8	LN0.50+FA20	9	10		
		GGBFS40	26	3	LN0.50+GGBFS10	63	120		
		SF5	67	62	LN0.50+GGBFS20	47	103		
		SF7.5	19	8	LN0.50+SF5	69	137		
		SF10	10	0	LN0.50+SF7.5	51	14		
Steam-Cured Specimens	(A) Aggregate	Percent (%)		LN0.25		64	92		
		FA10	54	16	LN0.50	79	42		
		FA20	20	7	LN1.0	67	7		
		FA30	7	6	LH0.25	45	23		
		FA40	7	4	LH0.50	42	7		
		GGBFS10	49	13	LH1.0	26	8		
		GGBFS20	34	12	LN0.50+FA10	30	13		
		GGBFS30	24	10	LN0.50+FA20	10	5		
		GGBFS40	12	6	LN0.50+GGBFS10	32	76		
		SF5	57	40	LN0.50+GGBFS20	23	16		
		SF7.5	43	24	LN0.50+SF5	52	91		
		SF10	54	13	LN0.50+SF7.5	55	18		
	(B) Aggregate	Percent (%)		LN0.25		109	135		
		FA10	55	63	LN0.50	110	165`		
		FA20	18	10	LN1.0	97	172		
		FA30	6	0	LH0.25	73	171		
		FA40	4	0	LH0.50	49	167		
		GGBFS10	64	71	LH1.0	11	4		
		GGBFS20	51	57	LN0.50+FA10	37	54		
		GGBFS30	27	5	LN0.50+FA20	13	9		
		GGBFS40	11	0	LN0.50+GGBFS10	70	123		
		SF5	89	58	LN0.50+GGBFS20	54	90		
		SF7.5	28	8	LN0.50+SF5	72	142		
		SF10	9	0	LN0.50+SF7.5	61	108		

Prosentit kuvaavat laajenemisen vähenemistä ilman seosaineita käytettävän portlandsementin laajenemisen suhteen. Portlandsementti on tyypiltään CEM I 42.5 R. Lukemat lyhenteiden perässä tarkoittavat lisäyksen prosentuaalista määrää painosta. Sarake AAR-4 osoittaa nopeutetun betoniprismamenetelmän tuloksia. Tutkimuksessa on käytetty kahta eri kiviainesta sekä kahta eri käsittelymenetelmää. Taulukon moist-cured tarkoittaa norminmukaista käsittelyä. Tulokset osoittavat seosaineiden vähentävän reaktion laajenemista käytetyissä kiviaineksissa ja olosuhteissa. Norminmukaisessa käsittelyssä huomataan silikan (10 %) lisäyksen olevan merkityksentöntä kiviaineksen B reaktioon, joten silikan vaikutus täytyy varmistaa rakenteessa käytettävän kiviaineksen mukaan. (Yazıcı et al. 2019) Tuloksia voidaan käyttää suuntaa antavana, koska voidaan huomata, että käytetyllä kiviaineksella on huomattava merkitys tuloksiin. Jokainen kiviaines voi reagoida eri tavalla seosaineiden lisäyksiin.

Lentotuhkan ja masuunikuonan lisäämiseen on julkaistu suosituksia RILEM:n toimesta (taulukko 3). Seosaineiden käyttöön reaktion vähentämiseksi suositellaan tarkempia tutkimuksia, jotta niiden käyttäytyminen saadaan varmistettua. Eri maiden väliset erot seosaineiden ominaisuuksissa tekee ongelmalliseksi laatia täsmällisiä suositusarvoja.

Taulukko 3. RILEM:n suositusarvot lentotuhkan ja masuunikuonan lisäämiseen alkali-kiviainesreaktion vähentämiseksi (Nixon & Sims 2016, s. 142).

Aggregate reactivity	Low lime fly ash (<8 % CaO and <5 % Na ₂ O eq.)	Medium lime fly ash (8–20 % CaO and <5 % Na ₂ O eq.)	Ground granulated blastfurnace slag (<1.5 % Na ₂ O eq.)
	% by mass of total cementitious material		
Low	Any	Any	Any
Medium	25	30	40
High	40	Not recommended	50

Suosituksset on määritelty kiviaineksen reaktiivisuuden sekä seosaineen laadun mukaan. Lentotuhka on jaettu kahteen laatuun, vähemmän kalkkia (CaO) sisältävään ja enemmän kalkkia sisältävään. Taulukon tulokset ovat ilmoitettu massaprosentteina käytettävissä olevan sementin massasta. Silikan lisäämiseen suositus on kahdeksan prosenttia ainoastaan vähän reagoivan kiviaineksen kanssa, kun piidioksidin määrä silikassa on yli 85 % (Nixon & Sims 2016, s. 142).

Lentotuhkan ja masuunikuonan suositusarvoja käytettäessä niiden sisältämiä alkaleita ei tarvitse lisätä laskettaviin alkaleihin. Pienempiä lisäyksiä varten on julkaistu alustava suositus koko betonin alkalimäärän laskentaan taulukossa 4. (Nixon & Sims 2016, s. 142)

Taulukko 4. Lentotuhkan ja masuunikuonan alkalien lisääminen betonin koko alkalipitoisuuteen (Nixon & Sims 2016, s. 142).

Proportion of addition in cement	Proportion of alkali from addition to include in calculation of alkali content of concrete mix
<i>Slag</i>	
25–39 %	50 %
<25	100 %
<i>Fly ash</i>	
20–24 %	20 %
<20	100 %

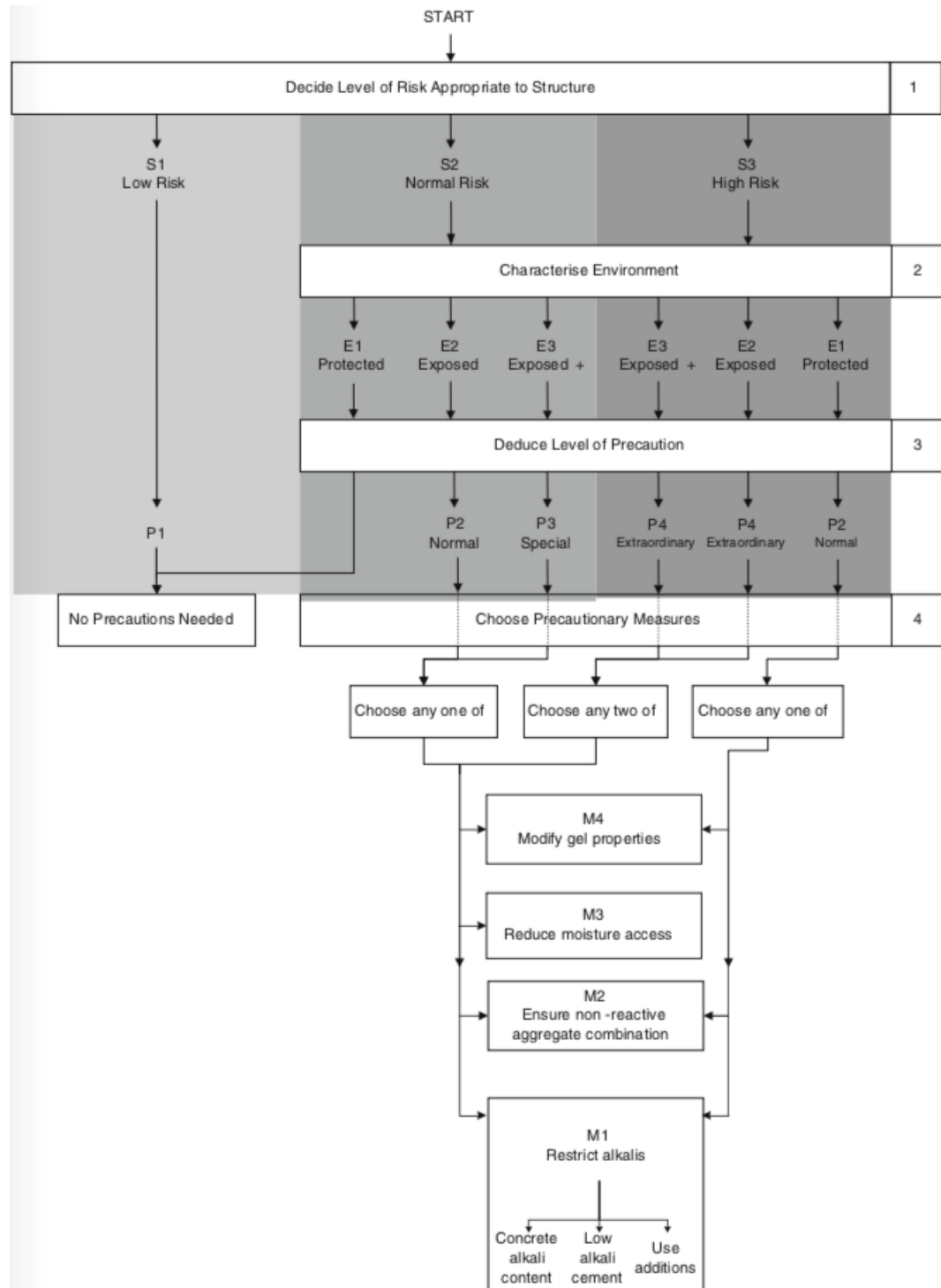
Sementin vaikutuksista reaktioon pitää tehdä tarkempia tutkimuksia, jotta reaktiivisuus saadaan tarkemmin selville. RILEM:n suositukset ovat suuntaa antavia eikä välttämättä toteudu kaikkien betonin osa-aineiden kanssa. Erityisesti RILEM:n ohjeistuksen mukainen betoniprismamenetelmä antaa tietoa sementin käyttäytymistä reaktiossa.

4.3 Olosuhteet

Ympäristöolosuhteisiin on mahdoton vaikuttaa ja ne esittävät suurta osaa alkalikiviainesreaktiossa. Kosteuden eristämällä voidaan ehkäistä rakenne reaktiota vastaan, mutta lämpötilan laskeminen ainoastaan hidastaa reaktion etenemistä. Uuden rakenteen olosuhteiden osalta tärkeintä on yrittää vaikuttaa kosteudenhallintaan ja näin voidaan eliminoida yksi reaktion tärkeimmistä tekijöistä. Suomen ilmasto-olosuhteissa reaktion ehkäisemiseksi tuleekin miettiä kohteita, joissa riittävä kosteuspitoisuus ilmenee. Kosteuden lisäksi lämpötilan vaikutusta ei tule mitätöidä suunnittelussa sen kiihdyttävän vaikutuksen vuoksi.

4.4 Rakenteen arviointi

Alkalikiviainesreaktion varotoimenpiteisiin RILEM on julkaissut suositukset taulukkomuotoon (kuva 7), missä rakenne luokitellaan varotoimenpidevaatimuksen mukaan luokkiin P1, P2, P3 ja P4. Luokka P1 ei vaadi toimenpiteitä reaktion ehkäisemiseksi ja luokka P2 normaalia keinoa rakenteissa. Normaali varotoimenpide tarkoittaa rakenteita, joissa vähäinen reaktio ei rajoita rakenteen käyttöä. Luokitus P3 ottaa huomioon ulkoiset rapautumisilmiöt sekä luokka P4 ei salli reaktiota rakenteeseen ollenkaan. (Nixon & Sims 2016, s. 132–137)



Kuva 7. Kaavio alkalikiviainesreaktion varotoimenpiteiden valintaan (Nixon & Sims 2016, s. 132).

Varotoimenpideluokkien määrittämiseksi täytyy rakenne luokitella riskin mukaan luokkiin S1, S2 ja S3. Luokkaan S1 voidaan määritellä rakenteet, joissa reaktio sallitaan. Tähän kuuluvia rakenteita ovat väliaikaiset rakenteet sekä ei-kantavat sisätilan rakenteet. Luokkaan S2 kuuluu tyypilliset rakenteet, joiden suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta. Tyypillisissä rakenteissa sallitaan tapauskohtaisesti vähäinen reaktio. Viimeiseen luokkaan S3

voidaan lukea rakenteet, joissa reaktiota ei sallita yhtään vahinkojen ehkäisemiseksi. Tähän luokkaan kuuluvia rakennuksia ovat ydinvoimalat ja padot. Riskien jälkeen luokitellaan ympäristöolosuhteet luokkiin E1, E2 ja E3. Ympäristöolosuhteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä rakenteiden alttiutta kosteudelle. Luokka E1 sisältää kuivat rakenteet. Luokkaan E2 voidaan sisällyttää kaikki kosteudelle alttiit rakenteet ja luokkaan E3 kaikki rakenteet, jotka altistuvat kosteuden lisäksi myös kiihdyttävälle ympäristötekijöille, kuten jäätymiselle. P-luokan määrittelyn jälkeen voidaan siirtyä valitsemaan toimenpide luokista M1, M2, M3 ja M4.

Luokka M1 tarkoittaa alkalien rajoittamista rakenteessa, M2 reaktiivisen kiviaineksen varmistamista tutkimusmenetelmillä, M3 kosteuden poistamista sekä M4 geelin ominaisuuksiin vaikuttamista. Geelin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa tässä tapauksessa litiumsuolojen lisäämisellä. Litiumsuolojen on huomattu vaikuttavan vähentävästi geelin kykyyn imeä vettä ja näin reaktion aiheuttamaan laajenemiseen. Litiumsuolojen määrälle ei ole tiettyä määrää vaan se riippuu kiviaineksen ominaisuuksista ja sitä suositellaan tutkittavaksi käytettävälle kiviainekselle ennen käyttöä. (Nixon & Sims 2016, s. 138–144)

5. YHTEENVETO

Alkalikiviainesreaktion yleisin muoto on alkalipiidioksidireaktio, johon vaikuttaa betonin alkalisuus, reaktiivinen kiviaines sekä riittävä suhteellinen kosteuspitoisuus. Reaktio aiheuttaa betonin rapautumista ja altistaa samalla rakenteen useille muille rapautumisilmiöille. Uuden rakenteen suunnittelussa reaktion ehkäiseminen hoituu rajoittamalla reaktioon vaikuttavia tekijöitä. Yhdenkin tekijän puute estää reaktiota syntymästä. Rakenteen suunnittelussa tulisi kiviaineksen valinnassa tutkia sen reaktiivisuus RILEM:n ohjeistuksien mukaisesti, jotta saadaan tarkempaa tietoa vaikutusmahdollisuuksista. Sementillä voidaan vaikuttaa reaktioon vähentävästi rajoittamalla alkalisuutta sekä siinä käytettyjen seosaineiden vähentävillä vaikutuksilla. Nykyiset ohjeistukset ovat suuntaa antavia ja jokaiselle rakenteelle pitäisi tutkia sen reaktiivisuus siinä käytetyillä osa-aineilla, koska pienetkin erot vaikuttavat reaktion toimintaan. Kaikkien aineiden vaikutusta reaktioon ei tiedetä yksityiskohtaisesti, joten erityisesti reaktiota estävien keinojen käyttö rakenteissa tulee varmistaa tarkemmilla tutkimuksilla.

LÄHTEET

Bobby, A.M., Hooton, R.D. & Thomas, M.D.A. (2000). The effect of product form of silica fume on its ability to control alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*. Vol.30(7), pp. 1139–1150.

Bragg, D. (2000). Alkali-aggregate reactivity in Newfoundland, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol.27(2), pp. 192–203.

Fernandes, I., dos Anjos Ribeiro, M., Broekmans, M.A.T.M. & Sims, I. (2016). Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis. RILEM TC 2019-ACS Recommended Guidance AAR-1.2, for Use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method. pp. 193

Fernández-Jiménez, A. & Puertas, F. (2002). The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*. Vol.32(7), pp. 1019–1024.

Holt, E. & Ferreira, M. (2013). Addressing ASR in concrete construction in Finland. In Wigum, B.J. & Bager, D.H.(Eds.) *Alkali Aggregate Reactions (AAR) in Concrete*. Nordic – Baltic Workshop. pp. 1–16.

Lahdensivu, J., Kekäläinen, P. & Lahdensivu, A. (2018). Alkali-silica Reaction in Finnish Concrete Structures. *Nordic Concrete Research*. Vol.59, pp. 31–44. 10.2478/ncr-2018-0013.

Lane, D. S. (1994). *Alkali-Silica Reactivity in Virginia*. Virginia Transportation Research Council. 70 p.

Nixon, J. & Sims, I. (2016). RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures: State-Of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS. Vol.17(1), 168 p.

Owsiak, Z., Zapala-Slaweta, J. & Czapik, P. (2015). Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. Vol.63(1), pp. 23–29.

Pyy, H., Holt, E. & Ferreira, M. (2012). Esitutkimus alkalikiviainesreaktiosta ja sen esiintymisestä Suomessa. VTT, Asiakasraportti, VTT-CR-00554-12/FI, s. 27

Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J.H. & Thomas, M.D.A. (2015). Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research*. Vol.76, pp. 130–146.

Shafaatian, S.M.H., Akhavan, A., Maraghechi, H. & Rajabipour, F. (2013). How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567). *Cement and Concrete Composites*. Vol.37(1), pp. 143–153.

Sims, I. & Nixon, P. (2003). RILEM recommended test method AAR-0: Detection of alkali-reactivity potential in concrete – Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*. Vol.36(261), pp.472–479.

Yazıcı, H., Beglarigale, A., Tosun Felekoglu, K. & Türkel, S. (2019). Comparing the alkali-silica reaction mitigation potential of admixtures by using different accelerated test methods. *Construction and Building Materials*. Vol.197, pp. 597–614.